

進化が止まらない光学系

井上 憲人

光学系におけるレンズの歴史は、数千年あり、それを用いた光学系設計法は、これまで進展がなかった。しかし、メタレンズによって、この分野の進化に弾みがついた。新しいアイデア、技術、材料が相次いで発表されている。本稿では、それらの中から、次の4件の研究を紹介する。

1. 光圧縮材料で通常の顕微鏡が超解像度になる
2. VR/AR向けミリメートルサイズのフラットメタレンズ開発
3. 新しい液晶メタレンズ、電動ズーム
4. カメラのレンズ突起除去、レンズの代替で光学系を微小化

1. 光圧縮材料で通常の顕微鏡が超解像度になる

米カリフォルニア大サンディエゴ校 (University of California San Diego) の電気光学チームは、普通の光学顕微鏡の分解能を改善する技術を開発した。これは、生きた細胞の微細な構造や細部を直接観察するために利用できる。

この技術は、従来の光学顕微鏡をいわゆる超解像度顕微鏡に変える。それは、光がサンプルを照射する際に光波長を短縮する特別に設計された材料を必要とする。この圧縮された光により、顕微鏡は一段と高解像度で撮像することができる。

「この材料は、低解像度の光を高解像度の光に変換する。それは極めてシンプルで使いやすい。サンプルをその材料に乗せ、次に全体を通常の顕微鏡下に置く。凝った変更は不要である」と電気・コンピュータ工学科のチャオウィー・リウ教授 (Zhaowei Liu) は説明している。

Nature Communications に発表された研究は、低解像度という従来の光学顕微鏡の大きな限界を克服するものである。光学顕微鏡は生きた細胞のイメージングには便利であるが、もっと

小さなものを見るためには使えない。従来の光学顕微鏡は、200nmの分解能限界がある。つまり、この距離よりも近い対象は、個別の物体として観察されない。また、細胞内構造を確認できる解像度を持つ電子顕微鏡のようなより強力なツールがあるが、サンプルを真空チャンバに入れる必要があるため、生きた細胞のイメージングには使えない。

「大きな課題は、高解像度で生きた細胞に安全な技術を見つけることである」とリウ教授は言う。

研究チームが開発した技術は、両方の特徴を統合している。それにより、従来の光学顕微鏡は、最大40nmまでの解像度で生きた細胞下構造のイメージングに使える。

その技術は、双曲線型メタマテリアルと言われる一種の光収縮材料でコーティングされた顕微鏡スライドで構成されている。それは、銀とシリカガラスのナノメートル厚の交替層でできている。光が透過する際に、その波長が短くなり散乱して一連のランダムな高分解能スペckルパターンを生成する。サンプルをスライド上に設置すると、この一連のスペckル光パターンによ

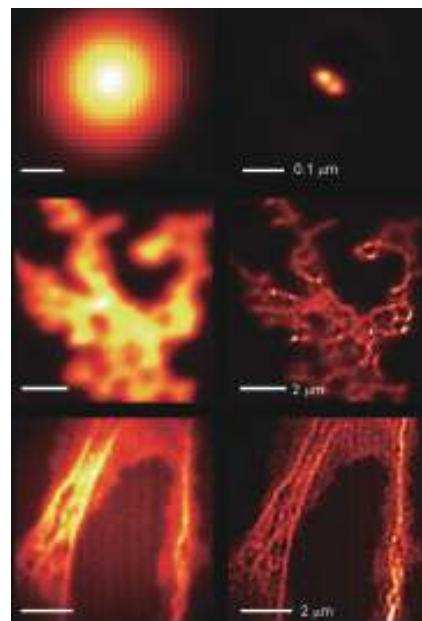


図1 ハイパボリックメタマテリアルなし(左の列)とハイパボリックメタマテリアル有り(右の列)の光学顕微鏡で撮影した画像の比較。Cos-7細胞内の2つの近接蛍光ビーズ(上段)、量子ドット(中段)、アクチンフィラメント(下段)。(出典:Nature Communications)

りさまざまな仕方で照射される。これが一連の低解像度画像を作り、画像はすべてとらえられて、再構成アルゴリズムでつなぎ合わされ、高解像度画像を作り出す。

研究チームは、市販の倒立顕微鏡でその技術をテストした。微細な特徴、アクチンフィラメントなどを蛍光標識されたCos-7細胞でイメージングすることができた。顕微鏡だけを使っては、明確に識別できない特徴である。その技術により、研究者は、40nmから80nm離して置いた微小な蛍光ビーズや量子ドットを明確に識別することができた(図1)。

研究チームによると、その超解像度技術は、高速動作にも大きな可能性が

ある。目標は、高速、超解像度、低光毒性を生きた細胞イメージング用の1つのシステムに組み込むことである。

研究チームは、その技術を拡張して、3次元空間で高解像度イメージングを実現しようとしている。

2.VR/AR向けミリメートルサイズのフラットメタレンズ開発

米ハーバード大SEAS(Harvard John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences)の研究チームは、VR及びARプラットフォーム向けにミリメートルサイズのフラットレンズを開発した。

過去数十年でコンシューマ技術における多くの進歩にもかかわらず、1つのコンポーネントが、イライラするほどに停滞している、それは光学レンズである。電子デバイスは、年を経るごとにどんどん小さく、高効率になるが、今日の光学レンズの設計と基礎となる物理学は、優に3000年前から変わっていない。

この問題は次世代光学系、仮想現実(VR)向けウェアラブルディスプレイなどの開発のボトルネックになっている。VRは、コンパクトで軽量でコスト効果の優れたコンポーネントを必要としている。

ハーバード大SEASで、フェデリコ・カパッソ氏(Federico Capasso)をリーダーとする研究チームが次世代レンズを開発している。これは、かさばる曲面レンズを簡素な平坦面で置き換えることでそのボトルネックを解消する見込みがある。このフラットレンズは、集光にナノ構造を使う。

2018年、カパッソ氏のチームは、光の可視光全域で機能する無色、収差なしのメタレンズを開発した。しかし、このレンズは、直径がわずか数十 μm



図2 フルカラーのニアアイファイバースキャンディスプレイを使用した拡張現実(AR)イメージングの結果。このディスプレイは、現実世界のシーンに浮かぶRGBカラーの虚像を表示する。(提供:ツァオイ・リ氏/ハーバード大)

であり、VRやARシステムでの実用的利用には小さすぎる。

今回、チームは、収差なし、RGBを集光する2mmメタレンズを開発した。また、VRとARアプリケーション向け微小ディスプレイも開発した。研究成果は、Science Advancesに発表されている。

「この最先端のレンズは、新しいタイプの仮想現実(VR)プラットフォームに道を開き、新しい光学デバイスの進歩を遅らせていたボトルネックを克服する」と論文のシニアオーサー、カパッソ氏はコメントしている。

「新しい物理学と新しい設計原理を使い、われわれは、今日の光学デバイスのかさばるレンズを置き換えるフラットレンズを開発した。これは、これまでで最大のRGB無色メタレンズであり、これらのレンズがセンチメートルサイズに拡大され、量産、商用プラットフォームに組み込めるという概念実証である」と論文の筆頭著者、SEASのポスドクフェロー、ツァオイ・リ氏(Zhaoyi Li)は話している。

以前のメタレンズと同様、このレン

ズは、二酸化チタンアレイを利用して光波長を等しく集光し、収差を除去する。これらのナノアレイの形状やパターンを変更することで、研究チームは光の赤、緑、青色の焦点距離を制御できる。そのレンズをVRシステムに組み込むためにチームは、ファイバースキャニングという方法を利用してニアアイディスプレイを開発した(図2)。

ファイバースキャニングベース内視鏡バイオイメージング技術からヒントを得たディスプレイは、圧電チューブで光ファイバを利用する。電圧がチューブに印加されると、ファイバ先端は、左右、上下にスキャンして、パターンを表示し、微小ディスプレイを形成する。そのディスプレイは、高解像度、高輝度、高ダイナミックレンジ、及び広い色域を備えている。

VRまたはARプラットフォームでは、メタレンズは、目の直前にあり、ディスプレイはメタレンズの焦点面内に存在する。ディスプレイによってスキャンされるパターンは、網膜に焦点を結び、メタレンズの助けを借りて、そこで仮想画像を形成する。人の眼には、その画像は、実際の眼から距離があるARモードの展望の一部として現れる。

「われわれは、メタオプティクスが現在のVR技術のボトルネック解消にどのように役立ち、われわれの日常生活で利用される可能性があることを実証した」とリ氏は話している。

次にチームは、レンズをさらに拡大することを狙っている。これにより、現在の大規模製造技術に適合させ、ローコストで量産できるようになる。

3.新しい液晶メタレンズ、電動ズーム

米コーネル大(Cornell University)応用・光学物理学部と韓国サムスン社

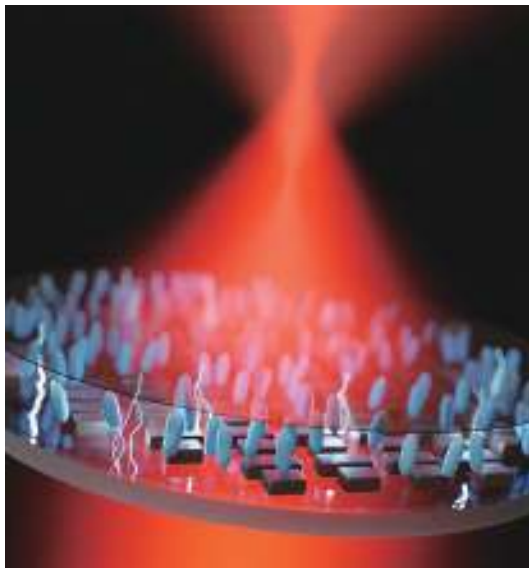


図3 コーネル大とサムスン社のエンジニアが開発した超薄型の電氣的にチューナブルなメタレンズの概念レンダリング。(提供:ダニール・シルキン氏)

(Samsung)の先端技術研究所の研究者は、この種のもので初のメタレンズ、すなわちコンポーネントを機械的に動かす代わりに電圧を使って光を集光するメタマテリアルレンズを作製した(図3)。

概念実証は、サテライト、望遠鏡、顕微鏡など、多くのイメージングアプリケーションで利用できる幅広いコンパクトな可変焦点レンズに扉を開く。これらは従来、機械的パーツを使って調整する湾曲レンズを使って集光する。アプリケーションによっては、スペース、重量あるいはサイズを考慮すると、焦点距離を変えるために従来のガラスまたはプラスチックレンズを動かすことが実用的ではないことがある。

メタレンズは、ナノアンテナ、つまり共振器のフラットなアレイであり、1 μ m以下の厚さで、合焦デバイスとして機能する。しかし、論文の筆頭著者である博士課程学生メリッサ・ボッシュ氏(Melissa Bosch)によると、これまで、メタレンズが一度製造されると、その焦点距離を変えることが難しかった。研究成果は、Nano Lettersに発表された。

研究チームによるイノベーションは、メタレンズと十分に確立されたLC技術を統合して、メタレンズの局部位相応答を調整する必要がある。これにより、研究者は、デバイスに印加される電圧を変えることで制御された方法でメタレンズの焦点を変えることができた。

「この組合せは、われわれが望み、予想したとおりにうまく行った。それは、連続ズームが可能な超薄型、電気チューナブルレンズとなり、焦点長のシフトは 最大20%だった」とボッシュ氏はコメントしている。同氏は、応用工学物理学部の教授で論文のシニアオーサーでもあるゲナンジー・シュベッツ氏(Gennady Shvets)の研究室で研究をしている。

ボッシュ氏によると、サムスン社の研究者は、その技術をARグラスに利用することを考えている。同氏は、サテライト、宇宙船、ドローン、暗視ゴーグル、内視鏡の光学レンズを交換するアプリケーションやスペースと重量の節約が優先されるその他のアプリケーションなど、多くの可能なアプリケーションを考えている。

シュベッツ研究室のポスドクで論文

の責任著書であるマキシム・シチェルバコフ氏(Maxim Shcherbakov)によると、研究者は過去10年、液晶とナノ構造を結合することで前進したが、誰もこのアイデアをレンズに適用しようとしなかった。今回、グループは、そのプロジェクトを継続し、プロトタイプ機能を改善する。

「例えば、このレンズは、単一波長、赤で動作するが、それが赤、緑、青の色スペクトルで動作すると非常に有用になる」(シチェルバコフ氏)。

コーネル大の研究グループは、現行のプラットフォームを出発点として、そのメタレンズの多波長可変焦点バージョンを開発している。

「他の波長のための最適化処置は、赤の処置と非常に似通っている。いろいろな意味で、最も難しい段階はすでに終わっているのです、すでに達成した成果の上に構築するだけだ」とボッシュ氏は話している。

4. カメラのレンズ突起除去、レンズの代替で光学系を微小化

スペースプレート"spaceplate"の概念は、光を操作する新しい方法である。これによってカメラや望遠鏡が紙のように薄くなる。

紙くらいの薄さの望遠鏡やはるかに小型で軽量な高性能カメラを使う日を想像できるだろうか。スマートフォンの背面のカメラバンプ(飛び出し)がなくなることを。

加オタワ大(University of Ottawa)の研究チームはNature Communicationsに掲載された論文で、光学デバイスを飛躍的に微小化することでこれらの考えを実現し、われわれの生活の多くのアプリケーションに影響を及ぼす可能性のある新しい光学素子を提案した。

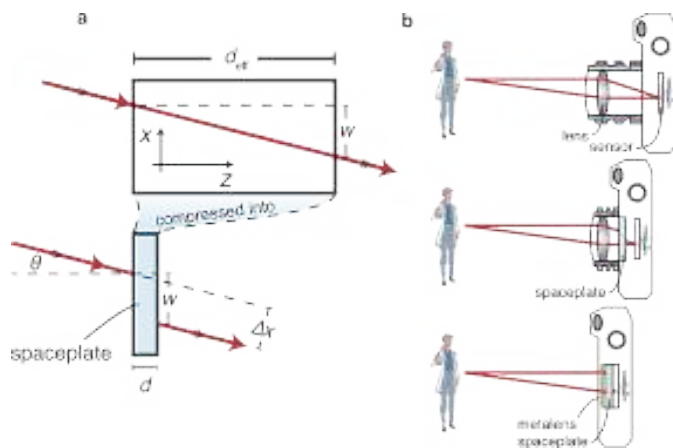


図4 a)スペースプレートは、 d_{eff} の伝搬長を厚さ d に縮小することができる。例えば、スペースプレートに角度 θ で入る入力ビームは、同じ角度で出力し、長さ w (横方向シフト Δx)横に変換される。まさにフリースペース d_{eff} である。b)標準的なカメラ(上)などのイメージングシステムに加えるスペースプレートは、カメラを縮小する(中央)。メタレンズとスペースプレートを直接センサに組み込むことで、超薄型モノリシックイメージングシステムが形成できる(下)。

以下は、論文の主筆、オラド・レシェフ博士(Orad Reshef)と研究リーダー、ジェフ・ランディーン氏(Jeff Lundeen)による解説である。

レシェフ博士によると、光は進行するときに自然に拡散する。「われわれが知っているすべての光学デバイスは、この拡散に依存している。それなしではカメラを設計する方法はわからない。例えば、どんな望遠鏡でも接眼レンズと対物レンズの間には大きなすき間があり、そこで光が拡散している」と同博士は言う。

スペースプレートは、光が小さなデバイスで長い距離を進むときと同じ拡散をシミュレートする。光には、スペースプレートが、それが占める「以上に大きな空間」に見える。ある意味で、スペースプレートは、レンズに対応するものであり、イメージングシステム全体を縮小するためにレンズができないことをする。

研究チームは、スペースプレートという考えを論文で紹介し、実験的にそれを証明し、それが可視光スペクトルの広帯域に適合することを示した。

ランディーン氏は、「光線の位置ではなく、角度に基づいて光を操作すると何が起るかを考えた。レンズは、光線の位置を介して動作する。角度は全く新しい領域であり、それを使って特に有用なものを作れることを誰も示したことはなかった。われわれは、空間を圧縮する有用なアプリケーションを特定した。さらに正にそのようなことをするプレートを実際に設計し、実験的実証が可能であることを示した」とコメントしている。

このデバイスによって、光学で小型化は不可能と考えられていた、あらゆる種類の非常に大きなデバイスを縮小できるようになる。これは、画期的なことだ。それを設計するためには、従来のレンズ設計法とは異なる新しい法則を考え出す必要がある。それが何であるかは誰にも分からない、未知の分野である(オラド・レシェフ氏)(図4)。

「レシェフ氏は、光線の位置(例えば、メタレンズ、すなわち、より一般的にはメタサーフェス)に基づいて光線を操作するためにナノテクノロジーを利用する専門家である。メタサーフェスで

光を操作することの限界について何気なく話を交わしていた時に、代わりに角度に基づいて光を操作してはどうかと私は提案した」とランディーン氏は話した。

スペースプレートは、ディスプレイでもセンサなど多くの光学システムを軽量化するために利用できる。例えば、先進的なスペースプレートは、紙のように薄い望遠鏡やカメラを実現する。それはスマートフォンの背後の「カメラポンプ」を取り除くために使える(レシェフ氏)。

人々は、大きな望遠レンズを装着した大きなカメラを苦勞して持ち歩く。スペースプレートの性能を十分に改善できると、はるかに性能の良い小型で軽量なカメラを構築できる。特に、メタレンズと組み合わせたスペースプレートにより、われわれは、例えばiPhone Maxの背面をフラットな薄型カメラにすることができる。それは、大きくて重いカメラと比べて14倍高解像度であり、微光での性能が優れている(ランディーン氏)。

薄くて小型のカメラは、カメラピルや内視鏡が、動脈や消化器管内を見ることができヘルスケアをはじめとするさまざまなアプリケーションで有用である。

今後は、圧縮率を高め、全般的な性能を改善する。圧縮率を5から100倍以上にし、全透過率を改善する設計をすでに考えている。これを継続するには、全く新しい設計パラダイムを考える必要がある。

レンズのような光学素子は、1000年以上前からあり、その設計法則は、400年以上にわたり十分に理解されてきたが、それでも、イメージングによってそのような基本的に新しい光学素子をわれわれはまだ発見している。